Олександр Слободян

*Старший викладач кафедри авіоніки
Національного авіаційного університету,
м. Київ, Україна, e-mail: sapfel@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0002-6202-4070>*

Олена Жарова

*Доцент кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем
Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна,
e-mail: jarova@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0001-7120-237X>*

ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ У РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ МАГНІТООПТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Анотація. За результатами огляду наукових публікацій, а також вивчення методів сучасної проблематики побудови вузлів радіотехнічних пристроїв були визначені наявні обмеження відносно функціональних можливостей перетворювачів частоти та встановлено про необхідність розширити функціональні можливості магнітооптичного перетворювача (МОП) для багатоцільового використання.

Розвиток радіотехнічних та телекомунікаційних засобів тісно пов'язаний зі швидкими темпами та масштабами зростання технологій, в першу чергу у сфері елементної бази. Також значне місце у вирішенні актуальних завдань займає проблема розробки нових методів, на основі яких будується широкий спектр пристроїв та систем сучасної радіоелектроніки. Однією із характерних особливостей в галузях науки і техніки є створення пристроїв різних класів, в яких використовуються нелінійні ефекти.

Однак, згідно з результатами проведеного аналізу, операції, пов'язані з перетворенням спектра сигналів, вимірюванням та обробкою радіотехнічних сигналів, не є досконалими.

Первинні перетворювачі сигналів в РТС повинні забезпечувати високу точність розпізнавання, вимірювання частоти, фази, напруженості, характеристик модуляції, пеленгацію джерела випромінювання та ін. Очевидно, що для підвищення ефективності здійснення перерахованих функцій можливе за допомогою використання вузлів МОП та оцінювання параметрів електричних сигналів, які утворюються на виході перетворювача.

Тому уперше було розроблено метод перетворення модульованих

гармонічних сигналів з використанням МОП на основі ефекту Фарадея, який реалізується за рахунок перенесення інформації на світлову хвилю для її подальшої обробки та перетворення, що надає змогу підвищити швидкість обробки та покращити шумові характеристики.

Ключові слова: метод, перетворення спектра, множення частоти, зсув фази, вимірювання фази.

Oleksander Slobodian

*Senior Lecturer, Department of Avionics,
National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: sapfel@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0002-6202-4070>*

Olena Zharova

*Assistant professor, Department of Telecommunication
and Electronic Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: jarova@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0001-7120-237X>*

SIGNAL CONVERSION IN RADIO TECHNICAL SYSTEMS BASED ON A MAGNETO-OPTICAL CONVERTER

Abstract. Based on the results of the scientific publications review, as well as the study of methods of modern problems of construction of radio devices, there were identified the existing limitations on the functionality of frequency converters the need to expand the functionality of magneto-optical converter (MOC) for multipurpose use.

The development of radio and telecommunications is closely linked to the rapid pace and scale of technology growth, especially in the field of element base. Also a significant place in the solution of the current tasks refers to the problem of developing new methods, on the basis of which a wide range of devices and systems of modern radio electronics is built. One of the characteristic features in the fields of science and technology is the creation of devices of different classes, which use nonlinear effects.

However, according to the results of the analysis, the operations related to the conversion of the signal spectrum, measurement and processing of radio signals are not perfect.

Primary signal converters in radio systems must provide high accuracy of recognition, measurement of frequency, phase, voltage, modulation characteristics, detection of the radiation source, etc. Obviously, to increase the efficiency of these functions is possible through the use of MOC nodes and evaluation of the parameters of electrical signals generated at the output of the converter.

For the first time, a method of converting modulated harmonic signals using MOC based on the Faraday effect was developed. It is realized by transferring information to a light wave for its further processing and conversion. It allows to increase processing speed and improve noise characteristics.

Keywords: method, spectrum conversion, frequency multiplication, phase shift, phase measurement.

Постановка проблеми. Процес розвитку радіотехнічних пристроїв та телекомунікацій в останні тридцять років тісно пов'язаний з небувалим за темпами та масштабами зростанням технологій в усіх сферах людської діяльності. Цьому прогресу сприяв стрімкий розвиток елементної бази, що широко впроваджувалась у сучасних технологіях. Значно розширилося коло застосування широкого спектру методів, що охопило радіозв'язок, телебачення, радіоуправління, радіолокацію, радіонавігацію, телекомунікацію, біологію, медицину, геофізику тощо, дозволило поновлювати новими способами вирішення радіотехнічних задач, що вимагають постійного покращення тактико-технічних характеристик, ефективності роботи, розширення функціональних можливостей вузлів радіотехнічних пристроїв та систем.

В наші дні радіотехніка розвивається науково-прикладної областю, про що доводить велика кількість науково-технічних досліджень, що базуються на фундаментальних теоретичних працях.

Говорячи про найближчі перспективи її розвитку, слід підкреслити тенденцію переходу до все більш до високочастотного діапазону електромагнітних коливань і хвиль.

Так, коливання надвисокочастотного (НВЧ) діапазону, що раніше застосовувалися в основному в радіолокації, стали широко використовуватися в телевізійних, системах зв'язку і телеметричних радіоканалах.

Кожний радіотехнічний пристрій виконує певну операцію над сигналами, характер якого цілком залежить від внутрішньої структури кола. Так, прийнято розрізняти перетворювачі форми електричних коливань, модулятори, детектори та багато інших видів радіотехнічних вузлів.

Радіотехнічні перетворення (модуляція, детектування, перетворення частоти або спектра і т. п.) здійснюються за допомогою нелінійних електричних кіл або лінійних кіл зі змінними параметрами (параметричних кіл).

Однак, згідно з проведеним аналізом, дотепер існує проблема, яка стримує розвиток техніки, перетворення спектра сигналів, вимірювання та обробки сигналів, зокрема, у вузлах радіотехнічних пристроїв в яких нелінійні елементи (НЕ) та їх характеристики не є достатньо дослідженими. Вона полягає у складності схемотехнічної реалізації пристроїв перетворення та обробки сигналів такого типу. Зокрема, це обумовлено тим, що перетворення сигналів за частотою, амплітудою, фазою з використанням пристроїв типу, які широко використовується у техніці зв'язку, призводить до спотворення сигналу та припускає використання додаткових конструктивних рішень.

Отже, актуальною є наукова задача, що полягає у розвитку методу, що

дозволяє здійснювати операції спектрального перетворення сигналу, множення частоти, амплітуди сигналу, зсуву фази сигналу та вимірювання різниці фаз, шляхом розробки способів реалізації таких операцій за допомогою магнітоотичного перетворювача (МОП) на ефекті Фарадея.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відома компанія Agilent Technologies оголосила у 2008 року про винахід нелінійного векторного аналізатора кіл і створення нової системи X-параметрів [1-3]. Технологія відкрила нові можливості для виміру параметрів змішувачів та новий підхід до вимірювання параметрів активних пристроїв, що працюють в нелінійних режимах. У 2009 році в університеті Вайкато, гр. Гамільтон, Нова Зеландія [4], а потім і в компанії Agilent Technologies, США [5], було розроблено нову методику вимірювання параметрів пристроїв з перетворенням частоти, у тому числі і зсуву фаз, що основана на застосуванні генератора комбінаційних частот – генератора гармонік.

При цьому, радіотехнічні системи характеризуються суттєвим ускладненням схемотехнічних рішень у наслідок широкого впровадження досягнень мікроелектроніки й складних алгоритмів обробки радіосигналів [6, 7]. Враховуючи результати попередніх досліджень, можна сміливо стверджувати, що потрібен докладний опис каскаду радіотехнічних систем та врахування різних факторів, що впливають їх роботу [8]. Каскади пристроїв побудовані за складною багатокоонтурною схемою [9], що й породжує певні труднощі в процесі їх аналізу або синтезу. Вимоги до лінійності характеристик кожного каскаду є дуже важливим, виходячи із заданих умов функціонування [10, 11]. Успішне вирішення даної проблеми можливе лише на основі більш точного дослідження багатокаскадного з'єднання нелінійних пристроїв [10, 12].

Відомі приклади розробки адаптивних методів боротьби з нелінійними спотвореннями [13 - 15] практично не придатні для розв'язання поставлених завдань. Знайдені технічні рішення [16], що дозволяють знижувати рівень тільки другої й третьої гармонік, мають досить низьку точність пригнічення нелінійних спотворень та малу швидкодію через керування вихідним сигналом. Синтезовані пристрої не повною мірою адаптивні, оскільки в них відсутнє регулювання сигналом помилки з виходу кола зворотного зв'язку, що значно погіршує їх характеристики точності та суттєво обмежує їх функціональні можливості.

Мета статті: Метою роботи є дослідження методів підвищення ефективності перетворення сигналів у радіотехнічних системах.

Виклад основного матеріалу. Головною задачею у теперішній час та у майбутньому є створення сучасної інфраструктури високотехнологічної радіоелектронної галузі промисловості, здатної створювати конкурентоспроможну на внутрішньому і світовому ринках електронну компонентну базу і радіоелектронну продукцію виготовлену на її основі.

Разом з тим без належної підтримки з боку держави залишилися організації радіопромисловості та засобів зв'язку, які здійснюють розробку і виробництво сучасної радіоелектронної апаратури, систем, комплексів, засобів, пристроїв, приладів і окремих радіоелектронних блоків.

Технічний рівень радіоелектронної продукції багато у чому залежить від вітчизняної електронної компонентної бази, що в даний час поступається за своїми параметрами аналогічній іноземній компонентній базі та не дозволяє організаціям, що випускає кінцеву радіоелектронну продукцію, створювати конкурентоздатні цивільні або спеціальні системи, комплекси і прилади, затребувані ринком.

У аналогічній ситуації опинилися організації й інші галузі промисловості. Проблема вийшла за межі однієї галузі та почала носити міжгалузевий системний характер. Організації авіаційною, суднобудівельною, космічною, атомною, а також інших галузей промисловості, які виготовляють радіоелектронну апаратуру, вимагають істотного технічного переоснащення і освоєння передових технологій. Прийняті в даний час цільові програми не повною мірою вирішують проблеми, що накопичилися за десятиліття.

Радіоелектронна галузь промисловості, акумулюючи самі передові досягнення природних наук і стимулюючи розвиток фундаментальних, пошукових і прикладних досліджень, істотно впливає на можливість досягнення необхідних значень параметрів складних систем, комплексів і виробів, що використовують радіоелектронну продукцію.

Щорічно розвинені країни виділяють більше 30 млрд. доларів на програми розвитку електронної компонентної бази і радіоелектроніки. При цьому самі фірми-виробники залишають не менше 10 відсотків засобів, отриманих від реалізації продукції, на виконання перспективних програм, пов'язаних з дослідженнями в області розробки конкурентоздатних виробів.

На сьогодні актуальним завданням є пошук нових способів надшвидкого перетворення радіосигналів для передачі і обробки інформації в РТС. В якості основи для такого перетворення може бути узяти магнітооптичний модулятор світла [17]. Такий модулятор складається з прозорої діелектричної феромагнітної плівки, поміщеної між поляризатором і аналізатором, які повернені на деякий кут один відносно одного. Зміни зовнішнього магнітного поля призводять до зміни кута повороту площини поляризації світла, що пройшло через плівку, за рахунок ефекту Фарадея і, як наслідок, до модуляції інтенсивності світла, що пройшло через аналізатор [18].

Проте у ближній ІЧ області спектру відомі електрооптичні кристали мають слабку прозорість. Крім того, загальними недоліками є висока напруга керування, необхідність застосування кристалів великих розмірів для отримання 100% глибини модуляції, обмеження, що накладаються на расходимість і монохроматичність світлового променя, сильна залежність величини модуляційних ефектів від температури. Від цих недоліків вільні монокристали ітрієвих феритів-гранатів, в яких для модуляції використовуються магнітооптичні ефекти. Наприклад, ітрієвий ферит-гранат ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) має коефіцієнт поглинання в області прозорості (1,1-5,5 мкм) близько $0,1 \text{ см}^{-1}$, що дозволяє використати їх у ближньому ІЧ діапазоні довжин хвиль [19].

Ферити зі структурою граната, що використовуються у метровому діапазоні, мають хімічну формулу $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, де R – ітрій (Y) або рідкоземельний

метал (Sm, Pr, Ce, La) з легуючими добавками. Ферити хімічного складу $Y_3Fe_5O_{12}$ відносять до залізо-ітрієвих гранатів. Використовуються також ферити $(Y, Al)_3Fe_5O_{12}$ і $(Y, Gd, Al, Mn)_3Fe_5O_{12}$. До полікристалічних феритів для пристроїв НВЧ відносяться ферити марок 90СЧ-Б, 10СЧ-20, 60СЧ-1. Такі ферити характеризуються значенням намагніченості насичення J_s , що досягає 1,3...3,5 кА/м. Відомі також монокристалічні ферит-гранати марок 140КГ-1 і 65КГ, де число перед буквою вказує на величину намагніченості насичення фериту в кА/м, помножену у 4 рази.

В приладах НВЧ сантиметрового діапазону використовуються ферити-шпінелі. До них відносяться Mg-Mn ферити складу $(Mg,Mn)O \times Fe_2O_3$, а також Li-Zn ферити складу $(Li, Zn)O \times Fe_2O_3$. Марки феритів 10СЧ1, 8СЧ7, значення намагніченості насичення 4...24 кА/м.

У міліметровому діапазоні НВЧ використовуються гексаферити зі структурою магнітоплумбіта с хімічною формулою $MeFe_{12}O_{19}$, де Me – це Ba або Sr. Параметричний ряд гексаферитів включає 23 марки матеріалів (04СЧА8...03СЧА), що характеризуються значеннями намагніченості насичення від 8 до 18,3 кА/м. В табл. 1 наведені фізичні властивості феритів.

Таблица 1.

Фізичні властивості феритів [20]

Параметр	Марка фериту					
	6000НМ	4000НМ	3000НМ	2000НМ	1500НМ	1000НМ
Початкова магнітна проникливість, $\mu_{\text{поч}}$	6000	4000	3000	2000	1500	1000
Відносний температурний коефіцієнт початкової магнітної проникливості від 20 до 70 °С 10^{-6} град ⁻¹	0,2 ... 1,5	0,5 ... 1,5	1,0 ... 2,0	Від -2 до +4,5	Від -1,1 до +7,0	Від -0,5 до +8,5
Гранична частота при $\text{tg} \delta$ 0,1 МГц	0,005	0,1	0,2	0,45	0,6	1
Гранична частота при $\text{tg} \delta$ 0,02, МГц	—	0,005	0,015	0,08	0,15	0,5
Магнітна індукція B при $H_m = 800$ А/м, Тл	0,35	0,36	0,38	0,39	0,35	0,35
Максимальна магнітна проникливість $\mu_{\text{макс}}$	10000	7000	3500	3500	—	1800

Напруженість магнітного поля H при $\mu_{\text{макс}}$, А/м	12	16	20	20	—	40
Залишкова магнітна індукція B_r (не більше), Тл	0,11	0,13	0,15	0,14	—	0,11
Точка Кюрі (не нижче), °С	110	140	140	200	200	200

Завдяки низьким магнітним втратам, великому значенню намагніченості насичення і вузькою, декілька ерстед, лінії феромагнітного резонансного поглинання ферит-гранат нині застосовується у пристроях НВЧ [19, 20]. Прозорі в оптичному діапазоні ферит-гранати, завдяки досить великого ефекту Фарадея [19, 21 – 24] знайшли широке застосування в магнітооптиці. Так само викликає інтерес до фериту-граната у зв'язку із зворотним ефектом Фарадея і добротними спіновими хвилями, що збуджуються в структурах з цього матеріалу [24].

Деякі ферити-гранати характеризуються великою прозорістю у ближній інфрачервоній області спектру в інтервалі довжин хвиль 1300 – 5500 нм, при $\lambda > 5500$ нм має місце зростання оптичного поглинання, пов'язане з поглинанням фотонів кристалічною решіткою, а поглинанні при $\lambda < 1500$ нм пов'язане з краєм електронної смуги, центр якої доводиться приблизно на 900 нм. Коефіцієнт оптичного поглинання k в області прозорості менше $0,1 \text{ см}^{-1}$. Правіше 100 мкм аж до НВЧ діапазону ферити гранатів мають високу прозорість, що важливо для прикладних задач. Проте, магнітооптики інтерес представляє видима і ближня інфрачервона (ІЧ) частина спектру.

Аналіз робіт в області магнітооптичних явищ в феромагнетиках були розпочаті ще в 1956 року. Дослідженнями магнітооптичних властивостей та електронну структуру перехідних металів групи заліза, феромагнітного резонансу в феритах-гранатах, магнітооптичні параметри ортоферитів в інфрачервоній та видимій частині спектра займалися багато відомих вчених (Г.С.Крінчік, М.В.Четкій, Р.Д., О.М.Шалигін, Г.М.Нурмухамедов, В.Д.Тронеко, С.А.Гущина, В.А.Артемов, Г.К.Тютнева, J.F. Dillon., D.L.Wood, J.P.Remeika та ін.).

У 1957 J. F. Dillon виявив, що феримагнітні кристали прозорі не тільки для радіохвиль, але і в оптичному діапазоні [25]. Виявлено гігантське обертання площини поляризації в порівнянні з парамагнетиками і діамагнетиками [25]. Отримано прозорі кристали з $\gamma = 0,03 \text{ см}^{-1}$ ітрій-галієвих ферит гранатах [26].

Відомо, що магнітне поле, спрямоване вздовж осі, збільшує розміри доменів, намагнічених відносно поля, і зменшує намагніченість в протилежному напрямку. Змінним магнітним полем можна модулювати світло. Коефіцієнт модуляції такого магнітооптичного модулятора не залежить від частоти, що

вигідно відрізняє його від електрооптичних, де в областях резонансу частотні характеристики дуже нерівномірні.

Слід зазначити, що відкриття прозорих феримагнетиків має першорядне значення для техніки і, безсумнівно, призведе до появи абсолютно нової апаратури різноманітного застосування. Мабуть, незабаром будуть знайдені ортоферіти з ще більш високими оптичними характеристиками. Завдання найближчого майбутнього – прискорення технічних розробок різних пристроїв і перехід від випробування лабораторних установок з ортоферітовими елементами до промислового виробництва. У той же час необхідно продовжувати систематичні експериментальні та теоретичні дослідження з метою створення науково обґрунтованої методики отримання прозорих феримагнетиків із заданими фізичними властивостями [27- 30].

Висновки. У роботі було розглянуто актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності спектральних перетворень сигналів у радіотехнічних системах на основі використання особливостей апаратної функції МОП та його вихідної нелінійної характеристики [31-33]. При цьому, для якісного перетворення сигналів, необхідно шукати нові способи, засновані на інших методах, як нелінійного елемента у яких використовується феримагнітний кристал, прозорого в ІЧ діапазоні. Основним завданням є створення, експериментальної лабораторної установки для дослідження середовища та перетворення радіосигналу базуючись на вихідних нелінійних характеристиках, а також дати достовірну відповідь, – в якій технічній реалізації вони зможуть замінити вузли в РТС.

Література:

1. Root D. E. A New Paradigm for Measurement, Modeling, and Simulation of Nonlinear Microwave and RF Components / David E. Root // Berkeley Wireless Research Center. Presentation. Agilent Technologies. – Apr. 17, 2009.
2. Betts, C. Gillease, J. Verspecht // Microwave Engineering Europe. – December 2008. – pp 16–21.
3. Vye, D. Fundamentally Changing Nonlinear Microwave Design / David Vye // Microwave Journal. – 2010. – vol. 53. No. 3. – pp. 22–38.
4. Simple Scalar Network Analysis of Frequency Converter Devices using the U2000 USB Power Sensor Series with the ENA Network Analyzer / Application Note 5989–8689EN // Keysight Technologies. – 2014.
5. Dunsmore, J. A New Method for Mixer Delay Measurements that Requires No Calibration Mixer / Joel Dunsmore // 41st European Microwave Conference (EuMC).– IEEE.– Manchester. – 2011. – pp. 480-483.
6. Погорелов А. И. Общие вопросы построения сигналов измерительных радиосистем. А. И. Погорелов, Л. Ф. Купченко. Пространственно-временная обработка сигналов – Харьков: ХАИ, 1986. – С. 3-11.
7. Погорелов А.И. Анализ систем обработки сложных пространственно-временных сигналов. Обработка сигналов в радиотехнических системах. – Харьков. – ХАИ, 1988. – С.1 64-173.
8. Shefer O. V. Investigation of nonlinear processes in radio devices as a guarantee of increase the qualityfunctioning for radiolocation systems / O. V. Shefer, V. P. Dorohobid // Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences: International Research and Practice - Conference. – Republic of Poland, Radom, RAE. – December, 27-28, 2017. – pp. 48-52.
9. Финк Л. М. Сигналы, помехи, ошибки. – М.: Радио и связь, 1984. – 216 с.

10. Прикладные математические методы анализа в радиотехнике / Ю. А. Евсиков, Г. В. Обрезков, В. Д. Разевиг, В. В. Чапурский, В. М. Чиликин / Под ред. Г. В. Обрезкова. – М.: В. школа, 1985. – 343 с.
11. Тихонов В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – 3 изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 608 с.
12. Ван Трис Г.Л. Синтез оптимальных нелинейных систем управления. – М.: Мир, 1964. – 316 с.
13. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: ЗАО МАКВИС, 1998. – 828 с.
14. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник; навчальний посібник. / За ред. Ю. Л. Мазора, Е. А. Мачуського, В. І. Правди. – К.: В. школа, 1999. – 838 с.
15. Справочник по спутниковой связи и вещанию. / Под ред. Кантора Л. Я. – М.: Радио и связь, 1986. – 356 с.
16. Чернега В. С. Расчет и проектирование технических средств обмена и передачи информации / В. С. Чернега, В. А. Василенко, В. Н. Бондарев. – М.: В. школа, 1990. – 224 с.
17. Васильев Б. И. Оптика поляризационных приборов. – М.: Наука, 1969. – 364 с.
18. Шерклифф У. Поляризованный свет. – М.: Мир, 1965. – 322 с.
19. Звездин А.К., Котов В.А. Магнитооптика тонких пленок. М.: Наука., 1988. – 192 с.
20. Физические величины. Справочник. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под редакцией И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991, – 1232 с.
21. Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.
22. Четкин М. В., Шалыгин А. Н. Эффект Фарадея и модуляция инфракрасного света в ферритах гранатах. Квантовая электроника, 1978. Т. 5. № 1. 158-159 с.
23. Wettleing W. et al. Optical absorption and Faraday rotation in yttrium iron garnet //physica status solidi (b). – 1973. – Т. 59. – №. 1. – С. 63-70.
24. Kajiwara Y. et al. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator//Nature. – 2010. – Т. 464. – №. 7286. – С.262.
25. J. F. Dillon, Jr., Bull. Substitution for Iron in Ferrimagnetic Yttrium-Iron Garnet. Applied Physics, Soc. Ser. II, 2, 238 (1957).
26. D. L. Wood, J. P. Remeika. Effect of impurities on the optical properties of yttrium iron garnet. J. Appl. Phys. 38(3), 1967 pp.1038–1045.
27. Ребрин Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. – М.: Сов.радио, 1977. – 336 с.
28. Киселев Г.Л. Приборы квантовой электроники. М.: Выс.школа, 1980. – 236 с.
29. Пахомов И.И., Ролосов О.А., Ровдествин В.Н. Оптико-электронные квантовые приборы. М.: Радио и связь, 1982. – 456 с.
30. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970. – 270 с.
31. Скрипец А. В., Тронько В. Д., Слободян О. П. Спосіб і пристрій вимірювання різниці фаз сигналів інфра- та низькочастотного діапазонів. Вісник Центрального наукового центру транспортної академії України. 2010. Вип. 13. С. 148–152.
31. Скрипец А. В., Тронько В. Д., Слободян О. П. Оптоелектронний спосіб множення амплітуд гармонійних сигналів інфра- та низькочастотного діапазонів. Вісник Центрального наукового центру транспортної академії України. 2011. Вип. 14. С. 122–124.
33. Слободян О. П. Магнітооптичний спосіб множення частоти сигналу низькочастотного діапазону. Наукоємні технології. 2018. Вип. 2(38). С. 203–209.

References:

1. Root D. E. A New Paradigm for Measurement, Modeling, and Simulation of Nonlinear Microwave and RF Components / David E. Root // Berkeley Wireless Research Center. Presentation. Agilent Technologies. - Apr. 17, 2009.

2. Betts, C. Gillease, J. Verspecht // Microwave Engineering Europe. - December 2008. - pp 16–21.
3. Vye, D. Fundamentally Changing Nonlinear Microwave Design / David Vye // Microwave Journal. - 2010. - vol. 53. No. 3. - pp. 22–38.
4. Simple Scalar Network Analysis of Frequency Converter Devices using the U2000 USB Power Sensor Series with the ENA Network Analyzer / Application Note 5989–8689EN // Keysight Technologies. - 2014.
5. Dunsmore, J. A New Method for Mixer Delay Measurements that Requires No Calibration Mixer / Joel Dunsmore // 41st European Microwave Conference (EuMC).– IEEE .– Manchester. - 2011. - pp. 480-483.
6. Pogorelov A.I. General questions of construction of signals of measuring radio systems. A.I. Pogorelov, L.F. Kupchenko. Space-time signal processing - Kharkov: KhAI, 1986. - S. 3-11. [In Russian]
7. Pogorelov A.I. Analysis of systems for processing complex space-time signals. Signal processing in radio engineering systems. - Kharkov. - KhAI, 1988. - S. 1 64-173. [In Russian]
8. Shefer OV Investigation of nonlinear processes in radio devices as a guarantee of increase the qualityfunctioning for radiolocation systems / OV Shefer, VP Dorohobid // Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences: International Research and Practice - Conference. - Republic of Poland, Radom, RAE. - December, 27-28, 2017. - pp. 48-52. [In Russian]
9. Fink LM Signals, interference, errors. - M.: Radio and communication, 1984 .-- 216 p. [In Russian]
10. Applied mathematical methods of analysis in radio engineering / Yu. A. Evsikov, GV Obrezkov, VD Razevig, VV Chapursky, VM Chilikin / Ed. G.V. Obrezkova. - M.: V. school, 1985 – 343 p. [In Russian]
11. Tikhonov V. I. Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems / V. I. Tikhonov, V. N. Kharisov. - 3rd ed. - M.: Hotline-Telecom, 2015 .-- 608 p. [In Russian]
12. Van Tries G.L. Synthesis of optimal nonlinear control systems. - M.: Mir, 1964 .-- 316 p.
13. Radioelectronic systems: the basics of construction and theory. / Ed. Ya.D. Shirman. - M.: ZAO MAKVIS, 1998 .-- 828 p.
14. Radio engineering: Encyclopedic head assistant; navchalnyy pos_bnik. / Ed. Yu. L. Mazora, E. A. Machus'kogo, V. I. Truth. - K.: V. school, 1999 .-- 838 p. [In Russian]
15. Handbook of satellite communications and broadcasting. / Ed. Kantor L. Ya. - M.: Radio and communication, 1986 .-- 356 p. [In Russian]
16. Chernega V. S. Calculation and design of technical means of exchange and transmission of information / V. S. Chernega, V. A. Vasilenko, V. N. Bondarev. - M.: V. school, 1990 .-- 224 p. [In Russian]
17. Vasiliev BI Optics of polarization devices. - Moscow: Nauka, 1969. - 364 p. [In Russian]
18. Sherkliffe W. Polarized light.- Moscow: Mir, 1965. - 322 p. [In Russian]
19. Zvezdin A.K., Kotov V.A. Magneto-optics of thin films. Moscow: Nauka., 1988 .-- 192 p. [In Russian]
20. Physical quantities. Directory. A.P. Babichev, N.A. Babushkina, A.M. Bratkovsky and others; edited by I.S. Grigorieva, E.Z. Meilikhova. - M.: Energoatomizdat, 1991, - 1232 p. [In Russian]
21. Semenov AS, Smirnov VL, Shmalko AV Integral optics for systems of transmission and processing of information. - M.: Radio and communication, 1990.-- 224 p. [In Russian]
22. Chetkin MV, Shalygin AN Faraday effect and modulation of infrared light in garnet ferrites. Quantum Electronics, 1978. T. 5. No. 1. 158-159 p. [In Russian]
23. Wettling W. et al. Optical absorption and Faraday rotation in yttrium iron garnet // physica status solidi (b). - 1973. - T. 59. - No. 1. - S. 63-70.
24. Kajiwara Y. et al. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator // Nature. - 2010. - T. 464. - No. 7286. - p.262.
25. J. F. Dillon, Jr., Bull. Substitution for Iron in Ferrimagnetic Yttrium - Iron Garnet. Applied Physics Soc. Ser. II, 2, 238 (1957).

26. D. L. Wood, J. P. Remeika. Effect of impurities on the optical properties of yttrium iron garnet. J. Appl. Phys. 38 (3), 1967 pp. 1038-1045.
27. Rebrin Yu.K. Controlling an optical beam in space. - Moscow: Sov.radio, 1977 .-- 336 p. [In Russian]
28. Kiselev G.L. Quantum electronics devices. M.: High school, 1980.-- 236 p. [In Russian]
29. Pakhomov I.I., Rolosov O.A., Rovdestvin V.N. Optoelectronic quantum devices. M.: Radio and communication, 1982 .-- 456 p. [In Russian]
30. Mustelle E.P., Parygin B.H. Light modulation and scanning techniques. Moscow: Nauka, 1970 .-- 270 p. [In Russian].
31. Skrypets A.V, Tronko V.D., Slobodian O.P. Method and device for measuring the phase difference of signals of infra- and low-frequency bands. Bulletin of the Central Research Center of the Transport Academy of Ukraine. 2010. 13. pp. 148–152. [In Ukraine]
32. Skrypets A.V, Tronko V.D, Slobodian O.P Optoelectronic method for multiplying the amplitudes of harmonic signals of infra- and low-frequency bands. Bulletin of the Central Research Center of the Transport Academy of Ukraine. 2011. 14. pp. 122–124. [In Ukraine]
33. Slobodian O.P Magneto-optical method of frequency multiplication of low-frequency signal. Science-intensive technologies. 2018. 2 (38). pp. 203–209. [In Ukraine]